

· 研究进展 ·

“华北克拉通破坏”重大研究计划结题综述

朱日祥*

(中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

[摘要] 本文综述了国家自然科学基金“华北克拉通破坏”重大研究计划的系统研究成果。重点阐述了在提出“克拉通破坏”新概念、基础观测数据积累、厘定华北克拉通破坏的时空范围、认识克拉通破坏本质、论证克拉通破坏动力学机制、建立“克拉通破坏”理论体系、以及探索克拉通破坏的资源效应等方面取得的突破性进展和创新性成果。简要展望了克拉通破坏和大陆演化研究领域的发展态势以及有待深入探索的课题。

[关键词] 华北克拉通; 克拉通破坏理论; 动力学机制; 资源效应; 大陆演化

地球表面由大陆和大洋两部分组成。大陆仅占整个地球表面的三分之一, 但却是人类赖以生存的场所, 人类所利用的 95% 以上的自然资源来自于大陆。因此, 大陆的形成与演化一直是固体地球科学中最根本、最重要的科学问题, 更是解决资源能源国家重大需求的根本所在。对于大陆形成和演化、内部结构以及对资源的控制作用, 人们已进行了长期探索。20 世纪 60 年代提出的板块构造理论极大地促进了地球科学的发展, 它解释了大洋板块的生成、发展和消亡过程, 阐释了大陆边缘地震、岩浆活动和地壳变形的原因, 论证了海底扩张和板块水平运动的方式, 总结了板块裂解、离散、漂移和汇聚的发展规律, 从而成为了解全球构造发展的指导性理论。板块构造理论为了解全球构造格局做出了重大贡献, 是地球科学的一场革命。板块构造理论主要是依据人们对大洋地质与构造的不断深入认识而创立的。板块构造理论认为岩石圈板块是刚性的, 地壳变形与岩浆活动仅限于板块边缘。这一认识对于大洋岩石圈较为适用, 对于大陆地质的研究结果显示, 大陆地壳普遍经历了构造变形和发生过不同程度的岩浆活动和变质作用, 板块构造理论对大陆地质过程和动力机制无法给予合理的解释。进一步研究发现, 大陆岩石圈与大洋岩石圈在物质组成、结构、流变学、深部热构造等方面存在巨大的差异。对大陆

演化独特性的认识, 促使人们开始重新审视大陆动力学和寻求能够合理解释大陆演化的理论^[1-3]。因而, 大陆演化及其动力学的研究, 已成为催生地球科学新理论的突破口。近年来, 国内外都设立了一系列重大研究计划探索大陆的形成和演化, 试图建立新的大陆演化理论体系。

大陆由造山带与克拉通组成, 前者是活动的, 后者是稳定的。这一观点最初由槽—台学说所提出, 板块构造理论对此基本是继承性接受。克拉通稳定的原因, 主要是其有低密度、低水含量和巨厚的岩石圈根, 从而能漂浮在软流圈之上。克拉通厚而干的岩石圈地幔, 从而使其能够在很大程度上抵御后期地质作用的改造而免于破坏。因此, 传统理论认为克拉通是稳定的。除了少数来自地球深部的岩浆活动外, 克拉通基本不发生岩石圈或地壳内部的构造变形和大规模的岩浆作用, 没有强烈的地震活动。华北克拉通保存有大于 38 亿年的古老陆壳, 在 18 亿年前进入稳定的克拉通阶段, 并且在中生代前长期处于稳定状态。然而, 我国华北克拉通东部在中生代则发生了明显的岩石圈减薄与克拉通破坏, 使其原有的稳定特征荡然无存。这表明克拉通既可以长期稳定, 也可以变得不稳定, 这是经典板块构造理论所不能解释的重大地质现象。因而引出了一个重要的科学问题, 即原本稳定的克拉通为何能够被破

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-02-28

* 通信作者, Email: rxzhu@mail.igcas.ac.cn

坏。华北克拉通中-新生代的地质活动现象,早已被我国地质学家所认知,并有不同的解释^[4-7]。早在20世纪初,翁文灏先生根据华北克拉通北部侏罗-白垩纪构造-岩浆(火山)活动情况,提出了“燕山运动”的概念。随后,陈国达先生提出了“地台活化”的观点。20世纪90年代,中外学者基于对前人资料的研究发现,华北克拉通东部岩石圈厚度减薄了100多公里,从而提出了“岩石圈减薄”或“去根”的概念。虽然众多地球科学家对华北克拉通作了长期的研究,但是,华北克拉通稳定性丧失的时空范围和动力学机制一直是困扰着地球科学家。克拉通为什么会失去稳定性这一根本问题一直悬而未决。因此,克拉通为何破坏是困扰地球科学家近百年的难题。

华北克拉通是全球克拉通破坏的典型,中国的这一地域优势和研究积累,为我国引领这一领域研究、抢占学术制高点创造了有利条件。国家自然科学基金委员会于2007年启动了“华北克拉通破坏”重大研究计划,该计划以克拉通破坏为核心科学问题,以观测和实验获取原始资料为先导,以地质构造、地球物理、岩石学地化、实验模拟、资源环境灾害、学科集成和战略研究为布局。经过十年努力,充分发挥地质、地球物理、地球化学等多学科综合优势,通过观测、实验和理论研究,从地球系统科学的角度认识华北克拉通破坏的时空分布范围和过程,揭示了克拉通破坏时地球内部不同圈层的相互作用和动力学机制,创建了克拉通破坏理论体系,探索了克拉通破坏的资源效应,实现了重大科学问题的突破,提升了对大陆形成与演化的认知水平。该计划的实施使得“华北克拉通破坏”成为全球大陆演化与动力学研究的热点,中国科学家在此领域发挥了引领作用,显著提升了我国固体地球科学研究的国际学术地位。

1 多学科全区域的观测研究获得重要的基础资料

在该计划执行的10年中,多学科科研队伍持续在华北克拉通及邻区全面开展地质考察,岩石采样和地球化学实验,深部结构探测,获取大量原始数据。地质研究中,考察了郯庐断裂带变形,胶东、辽东、内蒙变质核杂岩和伸展穹隆,燕山和太行山伸展和收缩变形,燕山带地层和盆地,鄂尔多斯周缘推覆构造,以及中国东部的岩浆活动与构造变形等。地球化学研究中,对出露

在辽东、山东、汉诺坝、燕山带、林西地区、朝鲜半岛、郯庐断裂带、中央造山带,大别-苏鲁造山带等克拉通东部不同地区古、中、新生代典型岩浆活动的产物,及其携带的深源岩石捕虏体和矿物捕虏晶进行野外调查、岩石采样。对大量岩石样品做了年代学测定和地球化学分析测试的系统性研究。研究样品主要包括中、新生代玄武岩及其地幔捕虏体、中生代镁铁质岩浆岩、中生代花岗岩、埃达克质岩、不同时期的地体麻粒岩、以及火山岩中的下地壳麻粒岩捕虏体等。

为探测华北克拉通及邻区下的地壳、上地幔结构,该计划全面部署,实施了覆盖全区域的深部结构地震探测^[8]。在整个华北克拉通及周缘,由总计688流动地震台站组成8条观测剖面和一个二维观测台阵;结合主动源地震探测的互补性,完成了3条长观测距人工地震宽角反射/折射剖面观测(3650 km)和2条气枪源OBS深地震海陆联合观测剖面(860 km)。通过发展和应用有效地震成像技术,从地震数据中获取了华北地区地壳、上地幔地震波速度分布、速度间断面结构形态和上地幔各向异性等信息。

该计划持续在华北克拉通及邻区全面开展了地质考察、岩石采样和地球化学实验及深部结构探测,全面获取了原始观测信息。广泛应用国际先进的探测实验技术,并自主研发了系列原位微区年代学和同位素分析方法^[9]和深部探测技术,对原始样品和数据做高精度(分辨)的分析研究,基本达到覆盖目标区的多学科观测。这些实验研究为从地表地质响应、地球内部的物质性质和结构、地球内部动力学过程来认识克拉通破坏,探索大陆演化奠定了坚实的观测基础。

2 华北克拉通破坏的时空范围、岩石圈的变化规律、克拉通破坏的本质

该项目全面开展了对华北克拉通演化过程的深入研究,探明了华北克拉通的深部结构与构造,明确厘定了华北克拉通破坏的时空范围;查明了中-新生代岩浆作用的时空差异,揭示了克拉通岩石圈的变化规律。提出岩石圈减薄、大规模的岩浆活动和构造变形只是华北克拉通演化过程中的表现形式,其实质是由于岩石圈地幔的物质组成与物理化学性质发生了根本性的转变,从而导致克拉通固有的稳定性遭到破坏,建立了克拉通破坏理论^[8,10]。

2.1 华北克拉通的深部结构与构造、中-新生代岩浆作用的时空差异、华北克拉通破坏的时空范围

对华北地区深部结构的地震学探测，获得了华北克拉通的地壳结构^[11-12]和岩石圈的厚度分布^[13-15]，发现华北克拉通东、西部地壳与岩石圈地幔结构和性质存在显著差异。东部陆块地壳(厚度 < 35 km)和岩石圈(厚约 60—80 km)明显不同于典型克拉通型岩石圈结构，西部陆块地壳(厚约 45 km)和岩石圈(厚达 200 km)则保持典型克拉通的特征，而中部陆块地壳和岩石圈厚度和结构都表现为强烈的横向非均匀性(图 1)。华北克拉通东部岩石圈底界面是强速度间断面，西部 80—100 km 深度处存在一个地震波速随深度下降的岩石圈内部间断面^[15]；岩石圈厚度分布提供了岩石圈减薄空间范围的直接证据。东部地壳表现了伸展与减薄，具有广泛的低速特征；指示存在大规模韧性变形构造的结构，发生过地壳重熔和弱化^[12]。这些结构特征表明，强烈岩浆作用和伸展作用改造了华北克拉通东部的地壳。由东向西，地壳逐渐增厚，

转变为平坦的分层结构，具有典型克拉通地壳的特征。在中部地区北侧，出现倾斜的低速层和地壳根带，残留了古元古代陆块碰撞拼合作用的构造痕迹^[11]。以上各方面的观测研究，确定了华北克拉通东部经历了整体性破坏与稳定性丧失，而西部地块仍保持整体稳定的属性。多学科的综合分析与研究，可靠地限定了华北克拉通的破坏发生在太行山以东地区。

大规模的岩浆活动、强烈的构造变形和巨量的岩石圈减薄是克拉通破坏过程中的表现。这些表现是确定克拉通破坏空间范围的地质依据。系统的浅部地质研究表明^[16-20]，早白垩世期间，华北克拉通东部地壳浅部以出现一系列伸展断层、伸展盆地及变质核杂岩为特征，表现为广泛的地壳伸展变形。而西部在呈现弱伸展背景下整体拗陷或断-拗结合的大型盆地格局，并且岩浆与断层活动微弱，反映了稳定的克拉通状态。华北克拉通晚古生代至三叠纪岩浆活动集中出现在华北北缘，侏罗纪的岩浆活动主要集中在北缘与东南缘，属于华北克拉通与南北块体拼合的响应。早白垩世岩浆作用的范围和强度达

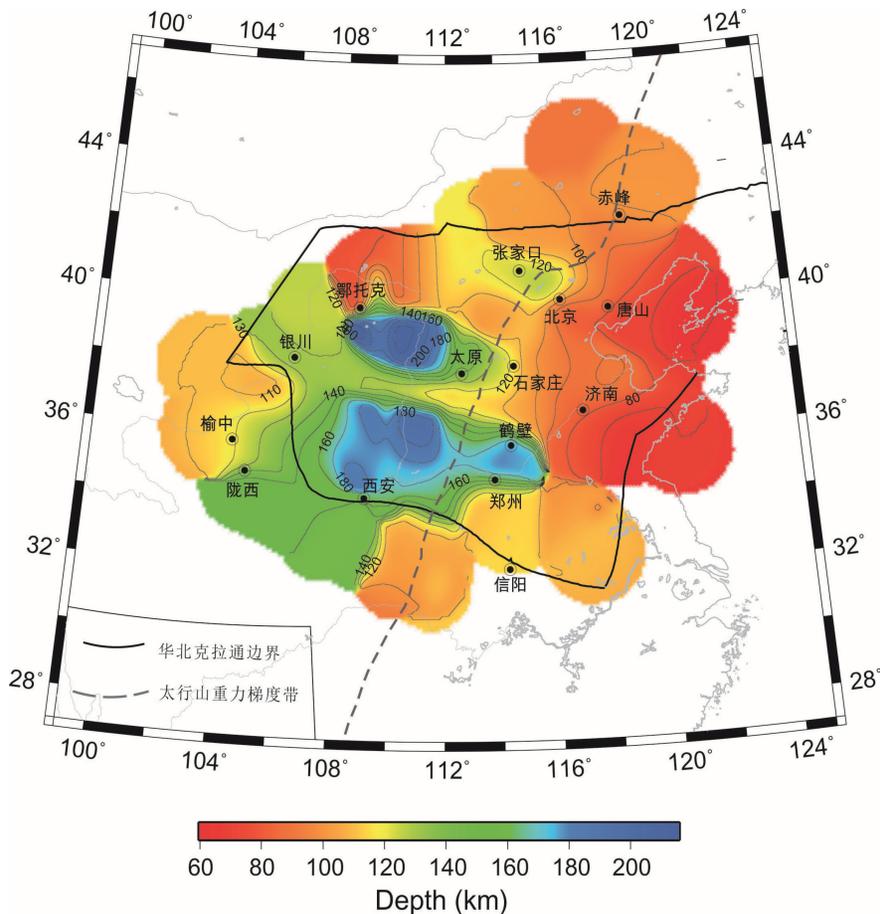


图 1 华北岩石圈厚度图

到顶峰,出现在整个克拉通东部,以出现大规模高钾钙碱性岩浆活动为特征,来源于富集岩石圈地幔。华北克拉通新生代火山作用强度相对减弱,呈现弥散性分布的特点。根据华北克拉通岩石圈物理化学性质的转变过程,结合岩浆活动、地壳变形、伸展盆地等标志,通过大量高精度年代学研究,确定了华北克拉通破坏峰期为早白垩世(峰值为 125 Ma)^[21]。在此破坏峰期之后,华北克拉通东部完全丧失了典型克拉通的稳定属性。

2.2 岩石圈组成和性质的变化及其机制

在该计划执行中,对显生宙所有时段岩浆活动产物及其捕虏体进行了矿物学、岩石学和地球化学研究,查清了华北地区古、中、新生代岩石圈的属性^[22-30]。研究中还还对具有典型反应结构的橄榄岩捕虏体和捕虏晶的矿物环带进行了精细的岩石学和原位微区分析,探讨了地幔橄榄岩与熔体的相互作用过程以及熔体的组成与来源。这些成果揭示了华北克拉通岩石圈显生宙演变规律,为认清克拉通破坏本质奠定了基础。

华北古生代金伯利岩及其石榴石橄榄岩捕虏体、地幔矿物捕虏晶、重矿物、金刚石固体包体矿物组合的温、压计算结果和橄榄岩捕虏体的 Re-Os 同位素资料,均表明华北克拉通东部在古生代时期存在一个古老的、地温梯度低的、厚达 200 多公里的岩石圈。当时的岩石圈地幔由方辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成,主量元素亏损, Sr-Nd 同位素组成轻微富集,具有典型的克拉通岩石圈地幔特征。在中生代华北克拉通东部岩石圈地幔主要由二辉橄榄岩和辉石岩组成,呈现为主量元素组成相对饱满、Sr-Nd 同位素组成比较富集的特征。华北岩石圈地幔物质组成在中生代的巨大转变中,还遭受了多种形式的壳源组分再循环(如大陆深俯冲、下地壳拆沉、洋壳俯冲等)对岩石圈地幔的改造作用,造成岩石圈地幔存在明显的时空不均一性。下地壳麻粒岩捕虏体的锆石年代学和 Hf 同位素地球化学研究揭示,显生宙以来华北古老下地壳也普遍遭受过多期、多阶段的岩浆底侵作用,经历过类似岩石圈地幔的组成改造过程。华北克拉通的破坏不仅表现在岩石圈厚度的大规模减薄,更重要的是表现在岩石圈的组成、性质和结构的巨大改变以及广泛的岩浆作用。破坏前具有典型克拉通型岩石圈属性,晚中生代克拉通破坏过程中岩石圈地幔性质转变为“大洋型”特征。

系列研究表明,华北岩石圈地幔组成转变过程是橄榄岩与不同来源的熔体相互作用的结果,地幔橄榄岩组成矿物间存在明显的 Sr-Nd、Li-Fe-Mg 同位素不平衡现象,华北地幔橄榄岩相对低的 Os 含量和高的 Os 同位素比值,都是橄榄岩-熔体相互作用的结果。通过多元同位素体系(Sr-Nd-Os-Li-Mg-Fe)的示踪研究发现,橄榄岩-熔体的相互作用具有多阶段性和熔体多来源的特点。

根据华北克拉通古生代的地温梯度模拟计算的岩石圈-软流圈界面(LAB)粘滞度与橄榄石 H₂O 含量之间的关系^[31],获得早白垩世华北克拉通岩石圈地幔底部(~200 公里)橄榄石的 H₂O 含量(~180 ppm)接近软流圈的水含量,新生代华北克拉通岩石圈地幔具有低的 H₂O 含量,晚白垩世华北克拉通岩石圈地幔相比于早白垩世岩石圈地幔 H₂O 含量明显降低,介于早白垩世和新生代之间(约为 40—200 ppm)。由于早白垩世是华北克拉通破坏峰期,因此上述研究说明稳定克拉通之所以能够被破坏,是与其被强烈水化导致的强度显著降低密切相关的。高水含量导致的粘滞度大幅降低为克拉通破坏创造了前提条件,而低水含量导致的粘滞度大幅升高则意味着大陆的稳定,从破坏状态到重新进入稳定状态对应着水含量的逐渐降低。华北克拉通岩石圈地幔和上覆下地壳之间水含量的显著差异暗示着壳幔界面在力学上可能是解耦的,如果克拉通破坏时也存在这样的差异的话,那么下地壳和岩石圈地幔整体拆沉的模型可能就不适用于解释大规模的岩石圈减薄。

3 早白垩世西太平洋板块俯冲是导致华北克拉通破坏的一级外部驱动力

认识华北克拉通破坏的动力学机制不仅是理解其破坏原因的关键,更是认识大陆演化规律的重要环节。该重大研究计划开展以来,不同学科的研究人员围绕着这一核心科学问题开展了深入的研究,获得了大量的信息,取得了突出的进展。综合研究表明,古太平洋板块的西向俯冲作用是导致华北克拉通破坏的一级外部驱动力^[32-33,8]。晚中生代期间,古太平洋板块(Izanagi 板块)向东亚大陆下持续俯冲中发生后撤,在地幔过渡带滞留脱水,使得上覆岩石圈地幔(大地幔楔)发生部分熔融和非稳态流动等动力学过程。晚中生代,古太平洋板块俯冲过程对华北克拉通东部从地表到上地幔以及地幔过渡带

的结构与物性都产生了强烈影响^[34-37],造成过渡带间断面形态高度不均匀,导致华北克拉通下方产生不稳定的地幔流动体系,并引起上地幔减压熔融或地幔物质向上流动;另一方面,上述不稳定的地幔流动体系及古太平洋板块俯冲还引起弧后拉张作用。正是这样的动力背景和非稳态地幔流动体系的共同作用,导致了华北克拉通东部的破坏。总之,早白垩世古太平洋板块的俯冲作用是导致华北克拉通破坏的一级外部控制因素和驱动力。俯冲板片在地幔过渡带的滞留脱水,使得上覆地幔发生部分熔融和非稳态流动,是导致克拉通破坏的主要途径(图2)。

太平洋板块俯冲作用于华北岩石圈演化的主要证据包括:(1)浅部构造地质方面的研究表明,华北克拉通东部在破坏期间拉伸方向发生了有规律的顺时针转变。这一变化规律与太平洋区大洋板块运动方向的变化相吻合,从而指示华北克拉通东部的破坏发生在弧后拉张的动力学背景下,大洋板块的运动方向控制了大陆边缘的弧后拉伸方向^[16]。(2)深部地球物理探测表明,向西俯冲的太平洋板块下插在太行山以东的华北克拉通东部之下,使后者成为俯冲大洋板片之上的活动大陆边缘。660 km 间断面的起伏形态和地幔过渡带厚度变化及其对应的低温环境代表了太平洋俯冲板片在这一区域上地幔底部的滞留特征^[34-35]。层析成像和横波分裂的综合结果^[36-37],指示上涌的软流圈运动到达岩石圈底部后,由于受到阻挡而主体转变为水平向流动。(3)华

北和东北 90 Ma 以来的基性岩浆源区中发现大量俯冲洋壳组分,可能来源于洋壳上部的蚀变玄武岩及少量沉积物,以及俯冲洋壳下部的堆晶辉长岩和超镁铁质岩石,说明完整的俯冲洋壳部分参与了该时期的岩浆活动^[38]。(4)华北东部岩石圈地幔的水含量具有随着时代变新而逐渐降低的特点,突显了水在岩石圈破坏过程中的作用及大洋板块俯冲的存在^[39-40]。西太平洋板块俯冲过程中释放大量的水至华北克拉通岩石圈地幔并导致强烈水化,使华北克拉通东部地幔对流系统失稳,上覆岩石圈被交代-熔融-弱化,继而导致岩石圈减薄和克拉通破坏。

4 胶东地区金矿床形成主要受控于华北克拉通破坏过程中的大规模岩浆作用

华北克拉通破坏的浅部效应,特别是资源效应,不仅关系到对地球系统科学的深入理解,也关乎到我国的可持续发展和国家战略需求。华北是我国战略资源和紧缺矿种黄金的重要生产基地,探明黄金储量约占全国的 50%。华北克拉通上的大型和超大型金矿主要分布在东部与中部陆块上,由两条近 NNE 向展布的东、西成矿带构成。东成矿带以胶东、辽东和吉南金矿集区为代表;西成矿带主要包括小秦岭-熊耳山、太行山中段和冀北-冀东等金矿集区。

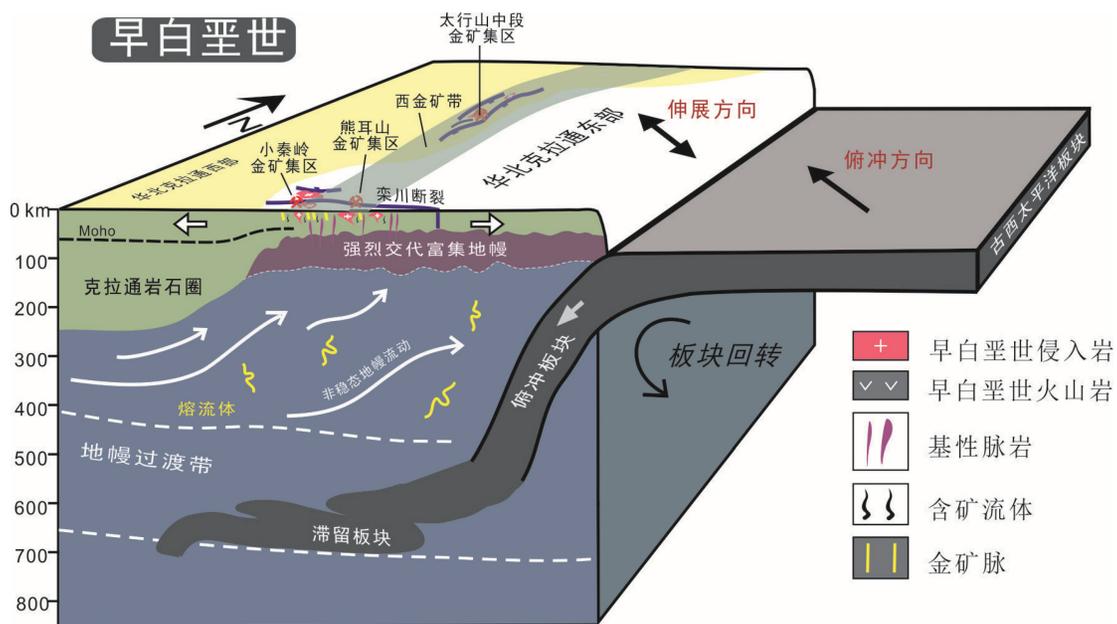


图2 早白垩世西太平洋板块俯冲作用导致华北克拉通破坏机制和过程示意图

华北克拉通大规模金成矿作用发生在早白垩世,与克拉通破坏的峰期一致。成矿作用具有以下主要特点^[41-43]:(1)金和其他成矿物质具有多源性,直接来自岩浆热液或由地壳流体从前寒武纪变质岩中萃取;(2)金的迁移和富集受统一流体系统控制;(3)成矿作用具有爆发性,成矿时代集中在135—115 Ma;(4)矿体的产状和分布明显受次级断裂控制,并多与晚中生代岩体具有较密切的空间关系;(5)形成于强烈伸展构造背景,正断层与变质核杂岩是主要的控矿构造。这些地质和矿化特征,明显不同于世界其他克拉通的脉状金矿床,难以用国际流行的造山型金矿床的成矿理论来诠释。因而,华北克拉通早白垩世金矿床不属于“造山型”,而是“克拉通破坏型”,其与“造山型”(挤压背景)金矿床的本质区别在于成矿构造背景(伸展背景)和成矿流体来源,主要与来自克拉通破坏相关的岩浆活动有关。在认识华北克拉通破坏性质和规律的基础上,获得了华北克拉通破坏控制了金成矿作用这一基本认识,为国家将辽东作为黄金接替基地提供了科学依据。

5 进展概述

该重大研究计划实施以来,以依靠专家、科学管理和有利创新为组织管理宗旨,充分发挥多学科综合优势,通过观测、实验和理论“三位一体”综合研究,从地球系统科学的角度认识华北克拉通破坏的时空分布范围和过程,揭示了克拉通破坏时地球内部不同圈层的相互作用和动力学机制,创建了“克拉通破坏”理论体系,探索了克拉通破坏的资源 and 生物效应,提升了对大陆形成与演化的认知水平。在科学活动中引导前瞻性思维,在执行中推进顶层设计,引导学科交叉,围绕核心科学问题,取得的科学成就概括如下:

(1)持续在华北克拉通及邻区全面开展地质考察、岩石采样和地球化学实验及深部结构探测,全面获取原始观测信息。依托先进的探测实验技术,对原始样品和数据进行了高分辨的分析研究,基本达到覆盖目标区的多学科探测,为深入研究大陆演化提供了重要的基础资料。

(2)自主研发了系列原位微区年代学和同位素分析方法和深部探测技术,并将这些开拓性的方法与技术广泛应用到克拉通破坏与全球大陆构造研究领域。

(3)全面开展了对华北克拉通演化过程的深入研究,揭示了克拉通岩石圈厚度的变化规律,查明了中-新生代岩浆作用的时空差异,明确厘定了华北克拉通破坏的时空范围。

(4)确定了早白垩世西太平洋板块俯冲作用是导致华北克拉通破坏的一级外部控制因素和驱动力;西太平洋板块俯冲、回撤以及俯冲板片在地幔过渡带的滞留脱水使上覆地幔发生熔融和非稳态流动,是导致克拉通破坏的主要途径。

(5)提出了岩石圈减薄、大规模的岩浆活动和构造变形只是华北克拉通演化过程中的表现形式,其实质是由于岩石圈地幔的物质组成与物理化学性质发生了根本性的转变,从而导致克拉通固有的稳定性遭到破坏,建立了克拉通破坏理论。论证了洋-陆相互作用导致克拉通破坏与大陆增生是全球大陆演化普遍规律,发展了板块构造理论。

(6)探索了克拉通破坏的浅部效应,确定了胶东地区金矿床形成主要受控于华北克拉通破坏过程中的大规模岩浆作用,为国家将辽东作为黄金接替基地,提供了科学依据。

该重大研究计划的实施使得“华北克拉通破坏”成为全球大陆演化与动力学研究的热点,中国科学家在此领域发挥了引领作用,显著提升了我国固体地球科学研究的国际学术地位。该研究计划的实施,提升了中国地球科学家的国际视野,为“特提斯地球动力学系统”重大研究计划项目、“克拉通破坏与陆地生物演化”科学中心项目等前瞻研究提供了人才储备。

6 展望

克拉通破坏属于大陆演化的范畴。大陆演化是地球科学的一个重要前沿领域,在许多方面无法用经典的板块构造理论解释。近年来,国内外都设立了一系列重大研究计划探索大陆的形成和演化,试图建立新的大陆演化理论体系。中国大陆得天独厚的地质条件也为中国地学界实现理论突破提供了难得的天然实验室。对中国大陆长期的研究积淀,使我国具备了创建大陆演化新理论的雄厚基础。中国持续增强的经济实力和不断增加的科研投入为开展协同创新研究、发展板块构造、实现大陆演化新理论突破创造了良好的机遇。抓住这一机遇实现理论突破,我国地球科学将会在大陆演化领域引领国际地学的发展方向,使中国从地学大国成为地学强国。

《华北克拉通破坏》重大研究计划的实施,聚集了全国优秀科学家,围绕着一个明确的科学目标协同攻关,大幅度地提升了我国在地球科学领域的科研攻关能力,为将中国成为国际地学强国做出了贡献。该计划成果提出克拉通破坏作为地球上发生的一种重要地球动力学过程,对大陆的形成演化有着重要的意义。对于大陆演化及克拉通破坏领域,下一步研究主要设想和建议如下:

(1) 西太平洋动力学过程。该重大研究计划揭示了晚中生代西太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的一级驱动力,但对于古太平洋板块俯冲带原始方位、位置、运动速度、俯冲方向和角度以及与大陆岩石圈之间的相互作用机理等重要问题仍然了解得有限,亟待开展深入的专门研究。对这些问题的深入探索,有助于重建西太平洋板块俯冲历史,进一步揭示西太平洋俯冲板片与克拉通之间相互作用的方式、过程和机理,探索洋-陆交汇转换过程,提升人们对洋-陆相互作用机理、流-固相互作用机制的深入认识。

(2) 大地幔楔演变。华北克拉通的岩石圈破坏是发生在大地幔楔中,是在大地幔楔演变中发生性质变化。西太平洋板块俯冲过程中,在俯冲板片上方形成地幔楔。而俯冲大洋板片的后撤,大幅度扩大了上覆地幔楔的空间,形成大地幔楔。大地幔楔是俯冲大洋板片、上覆大陆岩石圈、及流动地幔之间相互作用的场所,具有独特的演化特点与规律。正是大地幔楔复杂的演变过程,控制着上覆大陆岩石圈的演化及浅部响应,影响着深部岩浆过程、圈层相互作用、深部碳循环等诸多方面,具有重要的研究意义。对于华北克拉通东部,乃至整个中国东部,中生代以来地幔楔是如何演化的、与岩石圈减薄的关系、对各种地质过程的控制作用及其对浅表过程的影响等多方面,目前仍缺乏深入的了解。将克拉通破坏置于全球大陆演化背景下,从全球的角度理解克拉通大陆不同的演化方式与规律,从区域差异性和共性角度进一步认识大陆的稳定与破坏以及大陆形成和演化规律,这也是中国科学家能够为全球地球科学事业做出突出贡献的前沿领域。

(3) 华南大陆再造。板块构造理论成功地解释了大洋的形成与演化,但没有全面解释大陆形成和演化中出现的众多地质现象,如陆内再造、克拉通破坏等。因此,对大陆演化及其动力学的研究目前已成为催生地球科学重要理论的关键切入点。从华北

克拉通我们认识了克拉通也会失去原本具有的稳定性而发生破坏的演化规律。按照板块构造理论,陆块经碰撞、拼合后会发生克拉通化而形成统一且稳定的大陆。与华北克拉通长期稳定后“快速破坏”形成鲜明对照,华南大陆表现出长期不稳定性和陆内反复再造,代表了完全不同的另一类大陆演化方式。研究华南大陆再造过程、机制与动力学,也是全面理解大陆演化、发展板块构造理论的另一个突破口。华南大陆再造也具有中国的地域特色,是中国科学家在大陆演化探索中的另一个重要突破口。因而,开展华南大陆再造研究也具有十分重要的意义,有可能成为另一个利用中国地域优势引领国际地学研究的范例。

(4) 克拉通破坏的资源效应。该计划提出了华北克拉通破坏控制了金成矿作用的基本认识,进一步需要开展华北克拉通破坏如何控制巨量金成矿的深入研究。因此,需要基于对克拉通破坏的岩石圈结构和深部过程的了解,研究查明巨量金迁移、富集机理和成矿末端效应,阐明成矿区域差异性的关键控制因素,创建克拉通破坏成矿理论体系,回答华北东部克拉通破坏如何控制巨量金成矿的重大科学问题。进而系统评价深部与外围资源潜力,为寻找国家级黄金资源接替基地提供理论支撑。

油气资源是我国紧缺的战略资源,关系到民生与国家经济发展。华北克拉通也是我国陆相油气的主要产区,东部的渤海湾盆地与西部的鄂尔多斯盆地都是我国最重要的含油气盆地。华北克拉通破坏发生在东部,西部维持着稳定,并且晚新生代又出现西部活动性增强现象。与此相对应地,华北克拉通东、西部含油气盆地时代、类型、演化特征与油气富集规律等也具有显著的差异,晚新生代发育了独特的环鄂尔多斯地堑。显然,华北克拉通含油气盆地形成与演化及油气富集规律和远景与克拉通破坏具有密切联系。但是,这方面系统的专门研究还十分有限,相关的理解仍然不够深入。应用目前对华北克拉通破坏的深入理解,专门探索克拉通破坏与油气的关系,不但在学术思想上具有新意,也属于解决国家急需。

致谢 本文工作得到国家自然科学基金“华北克拉通破坏”重大研究计划的资助。受篇幅所限,文中未提及的工作敬请谅解。在此对该重大研究计划的指导专家组、项目管理组成员、所有项目的承担单位和

科研人员一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 郭安林, 张国伟, 程顺有. 超越板块构造——大陆地质研究新机遇评述. *自然科学进展*, 2004, 14(7): 729—733.
- [2] 许志琴, 张国伟. 中国(东亚)大陆构造与动力学——科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与动力学”专题进展. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1527—1538.
- [3] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. *地学前缘*, 2011, 18(3): 1—12.
- [4] 翁文灏. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动. *中国地质学会志*, 1927, 6: 9—37
- [5] 陈国达. 地台活化说及其找矿意义. 北京: 地质出版社, 1960.
- [6] 范蔚茗, Menzies M A. 中国东部古老岩石圈下部的破坏和软流圈地幔的增生. *大地构造与成矿学*, 1992, 16: 171—180
- [7] 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. *岩石学报*, 2008, 24: 1145—1174
- [8] 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1135—1159.
- [9] Yang YH, Wu FY, Wilde SA, Liu XM, Zhang YB, Xie LW, Yang JH. In situ perovskite Sr—Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chem Geol*, 2009, 264: 24—42.
- [10] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(5): 583—592.
- [11] Zheng TY, Zhao L, Zhu RX. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China Craton. *Geology*, 2009, 37: 395—398.
- [12] Zheng TY, Yang JH, He YM, Zhao L. Seismological constraints on the crustal structures generated by continental rejuvenation in northeastern China. *Sci Rep*, 2015, 5, doi: 10.1038/srep14995.
- [13] Chen L, Wang T, Zhao L, Zheng TY. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 267: 56—68.
- [14] Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration. *Phys Earth Planet Inter*, 2009, 173: 216—227.
- [15] Chen L, Jiang MM, Yang JH, Wei ZG, Liu CZ, Ling Y. Presence of an intralithospheric discontinuity in the central and western North China Craton: Implications for destruction of the craton. *Geology*, 2014, 42(3): 223—226.
- [16] Zhu G, Jiang DZ, Zhang BL, Chen Y. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Research*, 2012, 22: 86—103.
- [17] Wang T, Zheng YD, Zhang JJ. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 2011, 30: 1—27.
- [18] Liu J, Shen L, Ji M, Guan H, Zhang Z, Zhao Z. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 2013, 32. DOI:10.1002/tect.20064.
- [19] Zhu G, Chen Y, Jiang D Z, Lin SZ. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunnengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 2015, 656: 91—110. doi: 10.1016/j.tecto.2015.06.009.
- [20] Zhao T, Zhu G, Lin SZ, Wang HQ. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan—Lu Fault Zone, East China. *Earth-Science Reviews*, 2016, 152: 14—36.
- [21] Wu FY, Lin JQ, Simon AW, Zhang XO, Yang JH. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 103—119.
- [22] Ying J, Zhang H, Kita N, Morishita Y, Shimoda G. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jūnan, Shandong Province, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244:622—38.
- [23] Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Zhang J, Liu XM. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 2008, 101: 435—52.
- [24] Zhang HF, Goldstein S, Zhou XH, Sun M, Zheng JP, Cai Y. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2008, 155:271—93.
- [25] Zhang HF, Goldstein SL, Zhou XH, Sun M, Cai Y. Comprehensive refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton: further Os-Sr-Nd isotopic constraints. *J Geol Soc London*, 2009, 166:249—59.
- [26] Xiao Y, Zhang HF, Fan WM, Ying JF, Zhang J, Zhao XM, Su BX. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 2010, 117:229—46.
- [27] Tang YJ, Zhang HF, Deloule E, Su BX, Ying JF, Xiao Y, Hu Y. Slab-derived lithium isotopic signatures in mantle xenoliths from northeastern North China Craton. *Lithos*, 2012, 149:79—90.
- [28] Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Su BX. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle. *Earth Sci Rev*, 2013, 118:45—68.

- [29] Xiao Y, Teng FZ, Zhang HF, Yang W. Large magnesium isotope fractionation in peridotite xenoliths from eastern North China craton: Product of melt-rock interaction. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 115:241—61.
- [30] Zhang HF, Zhu RX, Santosh M, Ying JF, Su BX, Hu Y. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for craton destruction. *Gondwana Res*, 2013, 23:95—107.
- [31] 夏群科, 郝艳涛. 大陆岩石圈地幔中水的分布和大陆稳定性. *科学通报*, 2013, 58: 3489—3500.
- [32] 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. *科学通报*, 2009, 54: 1950—1961.
- [33] Zheng TY, Zhao L, Zhu RX. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L08303, doi:10.1029/2008GL033439.
- [34] Ai YS, Zheng TY. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China, *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21), 2089, doi: 10.1029/2003GL017678.
- [35] 许卫卫, 郑天愉, 赵亮. 华北地区 410 km 间断面和 660 km 间断面结构-克拉通活化的地幔动力学状态探测. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 678—685.
- [36] Zhao L, Allen RM, Zheng TY, Hung SH. Reactivation of an Archean Craton: constraints from P- and s-wave tomography in North China, *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17306.
- [37] Zhao L, Zheng TY, Lu G. Distinct upper mantle deformation of cratons in response to subduction: Constraints from SKS wave splitting measurements in eastern China, *Gondwana Res.*, 2013, 23: 39—53.
- [38] Xu YG. Recycled oceanic crust in the source of 90—40 Ma basalts in North China Craton: Evidence, provenance and significance, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 49—67.
- [38] Xia QK, Hao YT, Li P, Deloule E, Coltorti M, Dallai L, Yang XZ, Feng M. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2010, 115:1—22.
- [39] Xia QK, Liu J, Liu SC, Kovacs I, Feng M, Dang L. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications for the destruction of cratonic mantle lithosphere, *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 85—97.
- [41] Li JW, Bi SJ, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou MF, Li ZK, Qiu HN. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 349—350:26—37.
- [42] 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 克拉通破坏型金矿. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(8): 1153—1168.
- [43] Zhu RX, Zhang HF, Zhu G, Meng QR, Fan H, Yang JH, Wu FY, Zhang ZY, Zheng TY. Craton destruction and related resources. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 2017, 106:2233—2257.

Review of the achievements of major research plan on “Destruction of North China Craton”

Zhu Rixiang

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract This article reviewed the progress of the Major Research Plan by National Natural Science Foundation of China entitled “Destruction of North China Craton”. Major achievements and breakthroughs are summarized in the following aspects: proposing new concept of cratonic destruction, accumulating basic observation data, determining the spatial and temporal range of North China Craton destruction, cognizing the essence of cratonic destruction, demonstrating dynamic mechanism of cratonic destruction, establishing the theoretical system of cratonic destruction, and exploring the resource effect of cratonic destruction. The future direction and perspective of research areas of cratonic destruction and continental evolution is briefly discussed.

Key words North China Craton; theory of cratonic destruction; dynamic mechanism; resource effect; continental evolution